

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

А. В. Ефимов, А. С. Куценко, Б. И. Фролов, Е. Д. Меншикова, Харьков, Украина
Адель Аль Тувайни, Эль Кувейт, Кувейт

Повышение качества функционирования, надежности и безопасности работы тепловых энергетических установок (ТЭУ) и обеспечение их экологической безопасности представляет собой в современных условиях важную проблему. О важности этой проблемы говорит высокая интенсивность ведущихся в настоящее время во всем мире разработок эффективных методов управления энергетическими установками, диагностики и анализа параметров состояния входящего в их состав оборудования [1,2,3,4,5,6].

Оснащение тепловых и атомных электростанций современной вычислительной техникой делает возможным использование автоматизированных программных комплексов, реализующих задачи управления, диагностики и анализа процессов функционирования ТЭУ, в качестве систем поддержки принятия решений эксплуатационным персоналом с целью повышения их среднеэксплуатационной тепловой экономичности.

Основой функционирования таких систем является имитационная модель технологических процессов основного и вспомогательного оборудования ТЭУ, решающая методами численного эксперимента прямые и обратные задачи расчета параметров на произвольном режиме работы. Результаты расчетов, полученные с помощью имитационной модели ТЭУ, используются для решения задач управления, диагностики и анализа эффективности процессов генерации тепловой и электрической энергии.

Работы по созданию имитационных моделей сложных теплоэнергетических объектов в течение длительного периода проводились в ИПМаш НАН Украины, где были разработаны имитационные модели конденсационных паротурбинных установок для тепловых и атомных электростанций, достаточно хорошо описанные в [1]. В настоящее время эта работа продолжается в Национальном техническом университете «ХПИ» на кафедре парогенераторостроения. В ней основной акцент делается на разработку и реализацию в виде автоматизированного программного комплекса единой имитационной модели теплоэнергетических процессов в котельном, турбинном, основном и вспомогательном теплотехническом и тепломеханиче-

ском оборудовании электростанций многоцелевого назначения [2].

Технологические процессы, протекающие в этом оборудовании, описываются в имитационной модели системой отношений (равенств, неравенств, таблиц, логических условий). Эта система отношений состоит из уравнений термодинамики, газодинамики, теплообмена, технико-конструктивных и технико-экономических зависимостей. Сюда же входят уравнения состояния воды и водяного пара, а также кинематических и теплофизических свойств рабочих сред. Система характеризуется следующими особенностями: размер ее исчисляется сотнями; она существенно нелинейна (трансцендентна) и содержит неявные функции. Количественный и качественный состав системы зависит от технологической структуры, т.е. логической информации, описываемой с помощью технологического графа, и от целей исследования, которые предполагается достичь (управление, технико-экономические исследования, термодинамические, оптимизационные расчеты и т.п.). Система отношений может быть разрешена только при условии, что соблюдается определенный порядок в использовании отношений, обусловленный спецификой моделируемых процессов.

Эти особенности характеризует систему отношений, описывающих ТЭУ, как многопараметрическую систему с переменной структурой. Известно, что успех в решении структурно-параметрических задач во многом зависит от эффективности средств их описания и управляемости. Наиболее подходящими для этого класса задач представляются методы, использующие понятие гибридной функции, под которой понимается алгебраическое произведение числовой функции и функции предикатов (логики-числовой оператор)

$$F(x_1, x_2, \dots, x_L) = f(x_1, \dots, x_N) F(x_1, \dots, x_M),$$

где $F(x_1, x_2, \dots, x_L)$ – гибридная функция L переменных, $f(x_1, \dots, x_N)$ – числовая функция N числовых переменных; $F(x_1, \dots, x_M)$ – функция предикатов M предметных (нематрических) переменных.

В связи с этим, в имитационной модели отношения представляются в форме логики-числовых операторов в функции от информационной структуры технологического процесса в тепловой схеме ТЭУ.

Разработанный на базе имитационной модели ТЭУ программный комплекс имеет модульную структуру. Модуль термодинамического расчета параметров технологического процесса теплоэнергетической установки в целом представляет собой программную реализацию логики-числовых операторов: сохранения количества вещества, который решает уравнения расходов рабочего вещества или теплоносителей для каждого элемента технологической схемы установки; давления, который определяет давление рабочего вещества в элементах и узлах схемы; энтальпии, который определяет энтальпии и температуры рабочего веще-

ства в энергетическом, теплообменном и тепломеханическом оборудовании; энергии, который определяет тепловые и электрические показатели установки и обеспечивает необходимую для решения конкретной задачи точность расчетов этих показателей. Модуль подробного расчета параметров в котле проводит расчет параметров греющих и нагреваемых сред в пароводяном тракте котла, топке и газоходе и осуществляет связь между расчетом котла и ТЭУ в целом. Модуль подробного расчета параметров в проточной части турбины проводит расчет процесса расширения пара в направляющих и рабочих лопатках турбины по их сечениям и осуществляет связь между расчетами проточной части турбины и ТЭУ. Модуль расчета параметров технологического процесса в теплообменном, массообменном и насосном оборудовании, осуществляет расчет параметров в сепараторах, пароперегревателях, конденсаторах, подогревателях низкого и высокого давления, деаэраторах, испарителях, насосах и другом теплоэнергетическом оборудовании. В модуль управления имитационным экспериментом включены программы, реализующие статистические методы планирования эксперимента и его обработки с помощью многофакторных регрессионного и дисперсионного анализов данных. Модуль анализа расчетов, диагностики и документации накапливает и печатает результаты расчета параметров технологического процесса, диагностики состояния оборудования на основе вероятностного прогнозирования изменения во времени эксплуатационных характеристик и технико-экономические показатели качества функционирования ТЭУ.

Опыт эксплуатации программного комплекса показывает возможность его дальнейшего совершенствования, как с точки зрения используемых математических моделей, так и с точки зрения программной реализации. Появление за последние годы новых визуальных систем программирования, реализующих объектно-ориентированные языки, в частности C++, позволяет реализовать программный комплекс на новом уровне, применив объектно-ориентированный подход как к структурированию объекта моделирования, так и с точки зрения программной реализации.

На рисунке 1 приведена схема многоцелевой ТЭУ с основным технологическим оборудованием, разделенным на структурные блоки, отвечающие объектно-ориентированному подходу. В соответствии со структурным представлением схемы ТЭУ проводится формирование классов, с помощью которых описывается основное технологическое оборудование. Иерархическое представление классов при разработке имитационной модели многоцелевой ТЭУ приведено на рисунке 2.

В настоящее время выполнены работы по следующему совершенствованию автоматизированного программного комплекса:

- разработана имитационная модель и программный модуль расчета многокорпусной

опреснительной дистилляционной установки мгновенного вскипания, входящей в состав ТЭУ. Это особенно актуально для стран, расположенных в жарких климатических зонах, где проблема получения чистой питьевой воды с каждым годом становится все более острой.

- усовершенствована имитационная модель паровой турбины, в основу которой положен поступенчатый газодинамический расчет проточной части по сечениям лопаток. Такой подход имеет ряд преимуществ (расчет сверхкритических режимов работы, расчет потерь в лопаточных аппаратах и др.) по сравнению с традиционным подходом, основанным на использовании уравнения Стодола - Флюгеля. Распределение параметров в проточной части находится путем решения системы уравнений для потока пара методом последовательных приближений из условия удовлетворения баланса расходов. При этом учитываются протечки через зазоры в периферийных, диафрагменных и концевых уплотнениях, отборы и подводы пара в проточную часть.

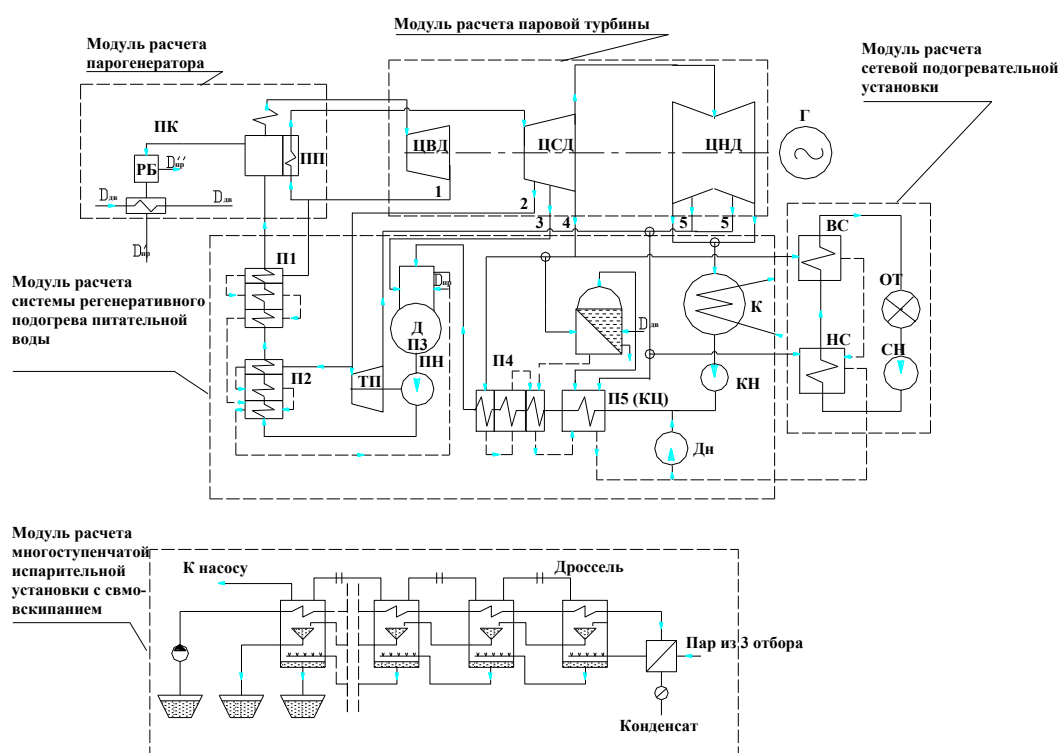


Рисунок 1 Схема многоцелевой ТЭУ и ее структурные блоки.

- усовершенствована имитационная модель котельной установки. Разработанная модель позволяет проводить поэлементный расчет пароводяного тракта котла и теплообменного оборудования в газоходе и рассчитывать все характеристики на

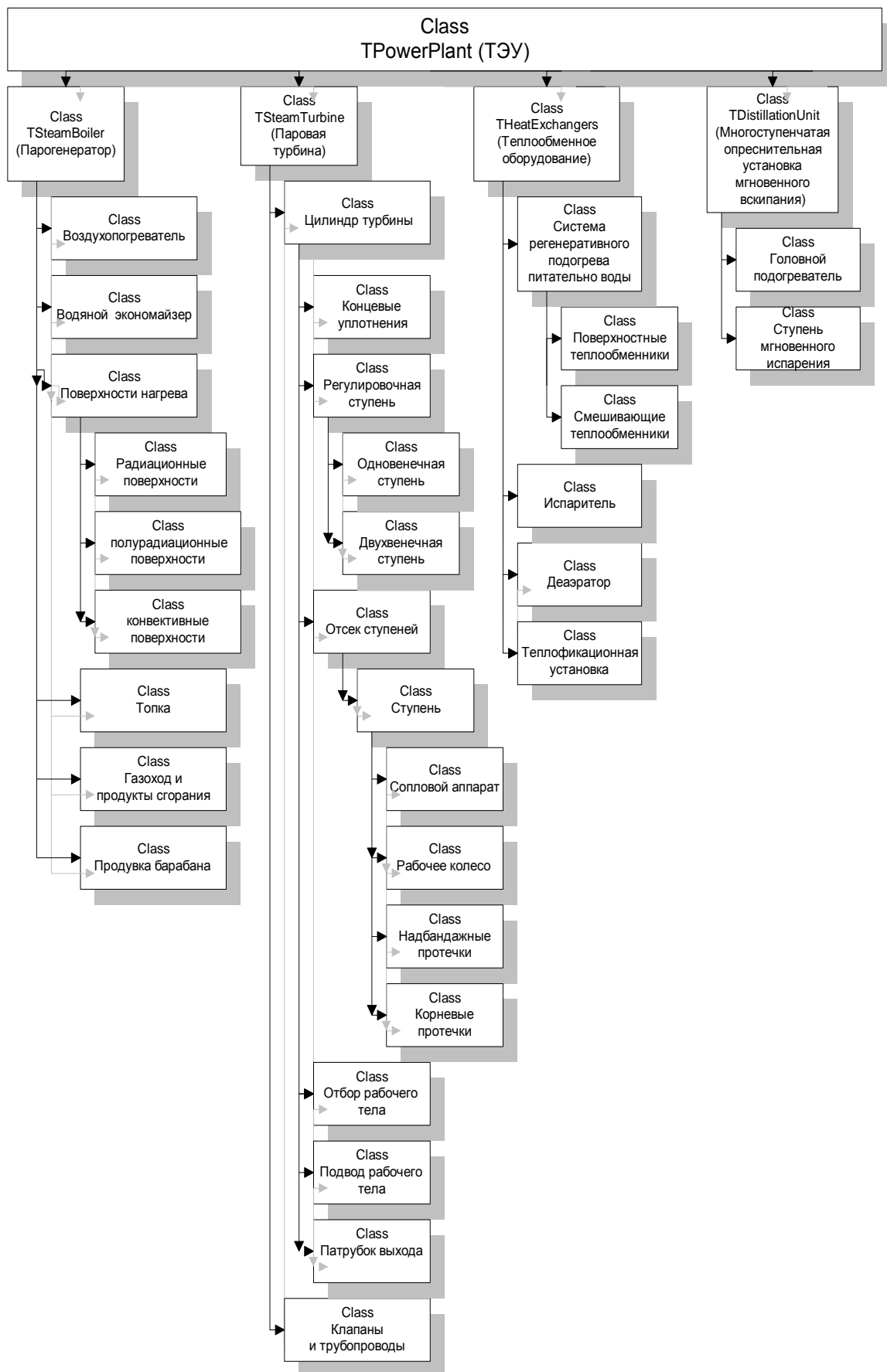


Рисунок 2 Иерархия классов при разработке имитационной модели ТЭУ

произвольном режиме работы.

- разработаны алгоритмы диагностирования основного технологического оборудования. В основе диагностирования лежит метод сопоставления фактических параметров агрегата, полученных путем непосредственных замеров, с рассчитанными на имитационной модели параметрами, соответствующими данному режиму работы.

С точки зрения программного совершенствования ведутся работы по реализации комплекса в среде клиент-сервер для использования в сетях Интернет/Инtranет. При этом большое внимание уделяется следующим аспектам: удобство доступа к информации для пользователей; безопасность хранения информации; снижение стоимости установки и эксплуатации программного комплекса; возможность централизованного пополнения информацией баз данных по технологическому оборудованию. Используя преимущества Интернет/Инtranет технологии, решаются вопросы обеспечения конфиденциальности информации, обеспечения ее полной секретности.

Отметим некоторые особенности имитационной модели теплоэнергетической установки, входящей в состав автоматизированного комплекса.

Имитационная модель описывает физические процессы, протекающие в элементах основного технологического оборудования ТЭУ системой уравнений вида $F(x, y, z, \dots) = 0$. Эти уравнения отражают законы сохранения энергии, массы и количества движения, а также замыкающие соотношения к ним. Размер системы уравнений в зависимости от классов выделенных при структурировании конкретной схемы ТЭУ и количества технологических аппаратов в ней, меняется и может достигать нескольких сотен уравнений. Это накладывает определенные требования на формирование имитационных моделей оборудования. При этом основной становится проблема обеспечения малого времени вычислений, так как при решении задач управления, диагностирования и анализа эффективности расчет с использованием имитационной модели выполняется многократно. При выборе моделей предпочтение отдавалось тем из них, которые описывались системой алгебраических и трансцендентных уравнений и по возможности исключались модели, описываемые дифференциальными уравнениями. Тем не менее, разработанная модель является достаточно требовательной к вычислительным ресурсам и не предназначена для использования в режиме реального времени.

Имитационная модель является адаптивной: адаптация модели проводится путем ее идентификации реальному состоянию оборудования, под которым понимается состояние оборудования с учетом эксплуатационного износа (например, износа усиков в уплотнениях турбины, загрязнения трубок в конденсаторе и т.д.). При этом подбираются установочные коэффициенты, позволяющие с высокой точностью проводить идентификацию модели с учетом реального состояния конкретного оборудования для любого частичного режима ра-

боты.

Расчет имитационной модели проводится для всех блоков (рис.1) в едином вычислительном процессе путем последовательных приближений. Решение находится из условия баланса расходов для всего оборудования ТЭУ. Таким образом, процедура расчета параметров имеет итерационный характер и может быть представлена как алгоритм получения значений следующего приближения независимых переменных по предыдущему приближению:

$$\vec{Q}_i = f(\vec{Q}_{i-1}).$$

Целенаправленная коррекция независимых переменных возможна только на основании использования информации об их влиянии на условия совместной работы узлов ТЭУ. Мерой выполнения этих условий являются невязки \vec{H}_i по расходу рабочих тел или теплоносителей между узлами схемы. Эти невязки \vec{H}_i зависят от значений независимых переменных

\vec{Q}_i , параметров режима \vec{U}_p и параметров оборудования \vec{v} . Приравнивая невязки нулю, получаем систему уравнений:

$$\vec{H}(\vec{Q}, \vec{U}_p, \vec{v}) = 0.$$

Для решения системы уравнений используется метод Ньютона - Рафсона. Итерационная процедура организована так, что на каждой итерации определяется аддитивная поправка $\Delta\vec{Q}_i$ к вектору независимых переменных:

$$\vec{Q}_i = \vec{Q}_{i-1} + \Delta\vec{Q}_i$$

Поправка $\Delta\vec{Q}_i$ является решением линейного алгебраического уравнения

$$\vec{H}_i = A_i \cdot \Delta\vec{Q}_i,$$

где $A_i = \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial \vec{Q}} \right)_i$ - матрица Якоби. Определение элементов A_i матрицы Якоби выполняется численно путем последовательного варьирования каждой из независимых переменных \vec{Q}_i и определения соответствующих невязок \vec{H}_i . Решение считается полученным, если

$$N = \frac{H_1 + H_2 + \dots + H_n}{n} \leq \varepsilon,$$

где N — среднеквадратичная невязка; ε — заданная точность расчетов.

Разработка имитационной модели технологических процессов тепловых энергетических установок является важным этапом на пути создания единой автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков ТЭС и АЭС многоцелевого назначения в ка-

честве системы интеллектуальной поддержки деятельности эксплуатационного персонала.

Литература:

1. Палагин А.А., Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок. Киев. Наук. думка, 1991. 201 с.
2. Ефимов А.В., Меньшикова Е.Д., Адель Аль Тувайни. Разработка имитационной модели котельной установки для автоматизированной системы управления и диагностики энергоблоков электростанций. Труды конференции MicroCad. Харьков, 2001 г. стр.72-78.
3. Лыхвар Н.В., Косяк Ю.Ф. Математическое моделирование и оптимальное проектирование паротурбинной установки//Теплоэнергетика 1986 №2, с. 69-72.
4. Цернер В., Андреа К. Задачи диагностики паровых турбин и система диагностики "Сименс"//Теплоэнергетика, 1993, № 5, С. 65-73,
5. Савельев Р.,З., Бродов Ю.М., Нирешптейн М.А. Контроль состояния поверхности теплообмена и определение оптимального срока чистки конденсаторов.//Электрические станции, 1983, № 1. С. 28-30.
6. Джеймс Х. Чаппел Программный продукт ePlant™ компании InStep Software L.L.C. (InStep). Чикаго, 1999.